

論文 低強度コンクリートと丸鋼の付着履歴特性のモデル化

洪 成^{*1}・荒木 秀夫^{*2}・加川 順一^{*3}

要旨：本研究は地震荷重を想定した繰返し荷重を受ける低強度コンクリート内における丸鋼の付着履歴のモデル化を試みるものである。付着応力度—抜け出し変位関係における単調荷重による包絡線および繰返し載荷時の各基準点と応力志向点をこれまでに行った引き抜き試験による実験結果から回帰的に抽出した。実験で得られた履歴曲線と照合し、抜け出し変形領域や鉄筋径に拘わらず全体的な傾向を追跡できることを確認した。

キーワード：低強度コンクリート, 丸鋼, 付着応力—抜け出し変位の履歴, モデル化

1. はじめに

近年、既存建築物の耐震診断・改修等が進む中でコンクリート強度が設計基準強度に達していない建築物、また診断基準¹⁾の適用範囲の下限値であるコンクリート圧縮強度の13.5MPaを下回る低強度コンクリートの存在²⁾が明らかになっている。以上のような現状に対し、低強度コンクリート部材に関する研究がすすめられ、その成果が蓄積されつつある³⁾。これらの研究では部材のせん断強度の評価や耐震補強の可能性に主眼が置かれている。このような研究の中で主筋に丸鋼を使用した部材の曲げ耐力が主筋降伏を仮定した略算式による耐力に達しないことが報告されている^{4) 5)}。これらの研究における試験体では主筋を加力用スタブ内で鉄板によって定着を確保したものの、主筋は試験区間において降伏することなく、部材全長にわたり引張状態になった。これらのことから主筋の降伏前に部材内部において付着劣化（滑脱）が進行し、部材断面における平面保持仮定が成立していないことが推察される。また、付着強度はコンクリートの圧縮強度に強く依存しており、低強度コンクリートの場合は更に付着滑脱し易くなると考えられる。耐力が曲げ耐力に達しないだけでなく部材の復元力特性は極端なスリップ形状となり地震時におけるエネルギー吸収能力の低下に結びつくものである。これらのことから丸鋼を主筋とする部材の抵抗機構を解明するために、低強度コンクリートと丸鋼の付着履歴関係を把握することは緊急の課題と考える。

このような背景から筆者等は低強度コンクリートに埋め込まれた丸鋼の引き抜き試験を実施してきた^{6) 7)}。文献⁶⁾は単調引き抜き試験であり、文献⁷⁾は繰返し引き抜き試験に関するものである。

鉄筋コンクリート部材の付着履歴性状に関して、付着応力度—抜け出し変位関係（以下 τ - S 関係と記す）のモ

デル化に関して、異形鉄筋の付着割裂破壊を対象とした森田らの研究^{8) 9)}をはじめとして多くのものがある。しかし、付着滑脱する丸鋼のものについてはほとんど無いのが現状である。特に低強度コンクリートを対象としたものは過去に例がない。文献⁷⁾では付着履歴のモデル化の可能性についても検討を加えているが、既往の研究結果は実験時における載荷履歴に依存しており汎用性のあるものとは言い難い。そこで本研究では τ - S 関係における履歴性状の各点を文献^{6) 7)}の実験データから回帰的に求め、 τ - S 関係のモデル化を行った。最後に、モデルの妥当性を検討するため、実験曲線と比較した。

2. 丸鋼の付着履歴特性

筆者らは低強度コンクリートに埋め込まれた丸鋼の付着強度を調べるために単調⁶⁾および繰返し引き抜き試験を実施してきた⁷⁾。低強度コンクリートの強度は診断基準の下限値を下回る11N/mm²、使用鉄筋は13 ϕ および19 ϕ である。試験方法はプリズム試験体からの引き抜きであるが詳細は文献^{6) 7)}を参考にされたい。ここで試験体の付着長は10d（d；鉄筋径）とし、付着応力度はこの間の平均付着応力度としている。変位は自由端部の値

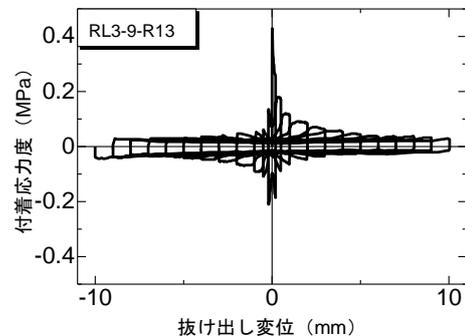


図-1 付着応力度—抜け出し変位関係

*1 広島大学大学院 工学研究科大学院生

*2 広島大学大学院 工学研究院准教授 工博（正会員）

*3 SG エンジニアリング（株）

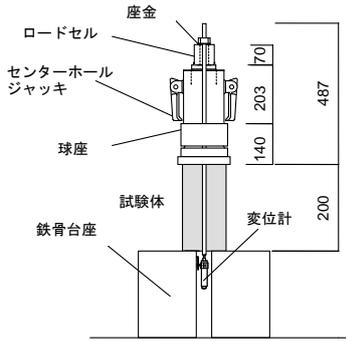


図-2 荷装置

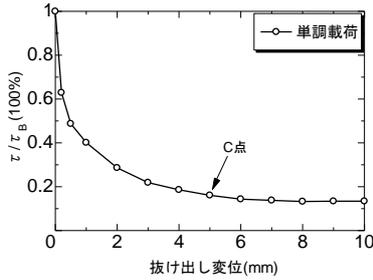


図-5 C点の変位の決定方法

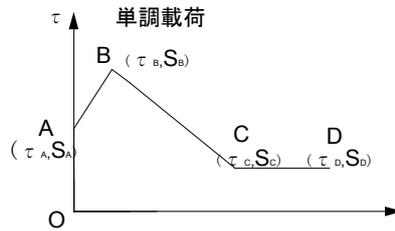


図-3 単調荷包絡線

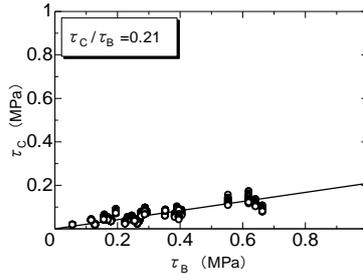


図-6 C~D点の付着応力度

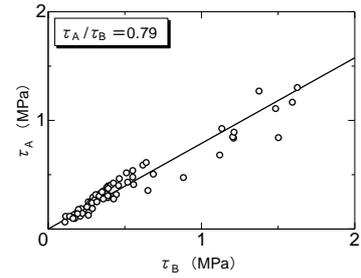


図-4 A点の付着応力度

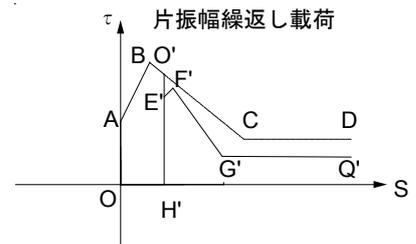


図-7 モデル化履歴曲線 (B-C間で除荷する)

である。丸鋼の付着力は鉄筋とコンクリートの固着力および摩擦力によって生じると考えられており、実験においても固着力の喪失後、微小変形で最大付着力を記録した後に、急激に付着力が低下し、摩擦抵抗による一定値に収束する傾向を示した。また、除荷時においては荷重が反転しても変位はそのままであり、ある応力度に達すると逆方向の変位が出始めるといった特徴のある復元力特性を持つことも実験から確認されている。図-1に13φ試験体の正負繰り返し荷重下におけるτ-S関係を例示する。

3 モデル曲線

実験では3つの荷方法⁷⁾を採用している。大振幅繰り返し(シリーズ1)、片振幅繰り返し(シリーズ2)及び正負繰り返し(シリーズ3)である。シリーズ1は振幅20mmで1回繰り返しであり、正側初期荷重の場合は単調荷に相当している。本論文では単調荷曲線と繰り返し荷曲線に分けてモデル化することとする。最初の除荷までは単調荷曲線を進め、除荷後荷重が反転した時点で繰り返し荷曲線に移動するものとする。また、繰り返し荷に片振幅繰り返しと正負繰り返しに分けてモデル化とする。

3.1 試験体と試験装置

低強度コンクリートと丸鋼の付着履歴性状のモデル化曲線を得るために、既往研究のデータ^{6,7)}を使用し、データ分析を行った。その中、単調荷包絡線に決定する用の試験体の詳細を表-1に、片振幅繰り返し荷包絡

表-1^{6,7)} 試験体一覧(単調荷)

試験体名	試験体数	鉄筋種類	鉄筋位置	鉄筋方向	コンクリート断面
HR13-9	8	13φ	中央	水平	150×150
VR13-9	3			垂直	
HR13-9-B	6		下端	水平	150×382
HR19-9	8	19φ	中央	水平	150×150
VR19-9	3			垂直	
HR19-9-B	6		下端	水平	150×382

表-2⁶⁾ 試験体一覧(片振幅繰り返し荷)

試験体名	試験体数	鉄筋種類	鉄筋位置	鉄筋方向	コンクリート断面
HR13-9	3	13φ	中央	水平	150×150
HR19-9	3	19φ			

表-3⁶⁾ 試験体一覧(正負繰り返し荷)

試験体名	試験体数	鉄筋種類	鉄筋位置	鉄筋方向	コンクリート断面
HR13-9	4	13φ	中央	水平	150×150
HR19-9	6	19φ			

線に決定する用の試験体の詳細を表-2に、正負繰り返し荷包絡線に決定する用の試験体を表-3に示す。試験体の詳細は文献^{6,7)}に参考されたい。また、試験体の荷装置様子を図-2に示す。

3.2 単調荷包絡線

無補修試験体のモデル化において単調荷時に仮定した骨格曲線を図-3に示す。本分析に用いたデータは表-1に示す引き抜き試験^{6,7)}からの抽出したものであり、13φと19φの試験体に対して、それぞれ中央筋8体、下端筋6体、垂直筋3体である。簡略化のためτ-S関係

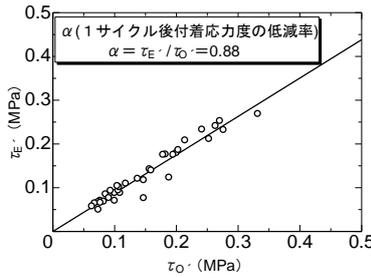


図-8 αの決定方法

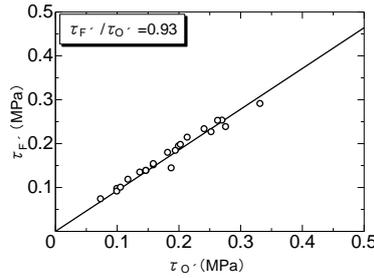


図-9 F'点の付着応力度

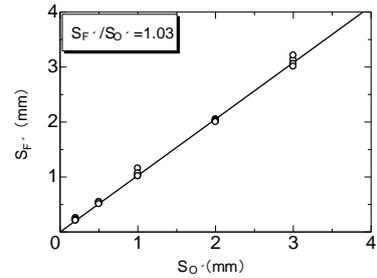


図-10 F'点の抜け出し変位

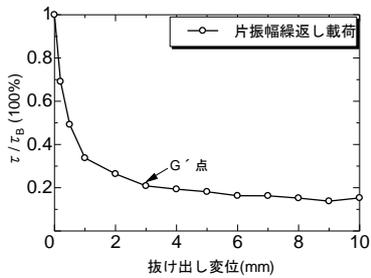


図-11 G'点の抜け出し変位

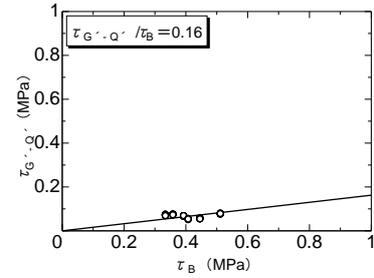


図-12 G'~Q'点の付着応力度

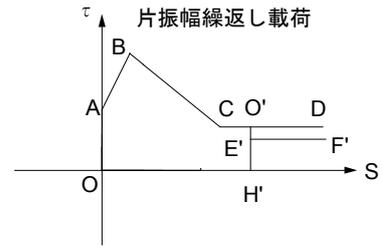


図-13 モデル化履歴曲線 (C-D間で除荷する)

を3領域に分け、A-B間は付着力上昇域、B-C間は付着力の降下域、C-D間は付着力の一定領域とした。単調載荷骨格曲線の各点の値を文献⁶⁾の実験値から回帰的に定めた。図中において最大付着応力度 τ_{Max} に対応する座標 B (τ_B, S_B) を基準とし A, C, D 点を決める。また、 τ_B は試験体によって大きくばらつくため、本論文では個々の履歴特性と対応させるため実験で得られた最大付着応力を用いている。将来的にはデータを蓄積し、コンクリート強度等と関連付けて定量的に決定する必要があると考えている。

A 点は固着力が全付着領域で喪失し、自由端部に変位が発生した時の付着応力度である。図-4に τ_A と τ_B の関係を示す。 τ_A と τ_B には強い相関があるとされ、文献¹⁰⁾では普通強度のコンクリートに対してではあるが $\tau_A = 0.6\tau_B$ としている。本論文では実験結果から A 点の座標を以下のように決めた。

$$A(\tau_A, S_A) = (0.79\tau_B, 0\text{mm})$$

最大付着応力の発生する B 点の変位については文献¹⁰⁾ではほぼ 0.1in. (0.254mm) としていたが、本実験では大きくばらつき 0mm から 0.174mm にかけて分布し、特に明瞭な傾向は見られなかった。そのため本論文では、B 点の変位 S_B を 0.1mm に決めた。

実験では付着力応力度は変形が大きくなると図-5に示すように僅かながら漸減し続けるが、モデルではある変位から一定と仮定し、一定となる開始点 C 点の抜け出し変位を 5mm とした。その時点の付着応力度は図-6から、以下のように決めた。

$$\tau_C = 0.21\tau_B$$

C 点の座標は以下ようになる。

$$C(\tau_C, S_C) = (0.21\tau_B, 5\text{mm})$$

最終点の D 点は C 点と同じ付着応力度を採用し、座標は以下ようになる。

$$D(\tau_D, S_D) = (0.21\tau_B, S > 5\text{mm})$$

3.3 片振幅繰返し载荷時の履歴特性

3.3.1 片振幅繰返し包絡線

(1) B-C間で除荷する場合

試験体の履歴曲線のモデル化を図-7に示す。本分析に用いたデータは片振幅漸増繰返し引き抜き試験⁷⁾から抽出したものであり、試験体数は表-2に示す 13φ3 体、19φ3 体である。単調載荷(付着低減域)に任意の O 点で荷重 0 の H' 点まで除荷し、再び正側に载荷を行う。τ-S 関係の包絡線を E'; F'; G'; Q' のように決定した。E' 点は再載荷で目指す点である。正負繰返し載荷と同じ、E' 点と O の変位は同様、付着応力度は O 点の応力に依存し、E' 点の座標を以下のように決めた。

$$E'(\tau_E, S_E) = (\alpha\tau_0, S_0)$$

α は単調載荷における骨格曲線上の除荷前付着応力度 τ_0 に対する 1 サイクルの履歴を経た時の付着応力度 τ_E の低減率で図-8から以下のように決定した。

$$\alpha = \tau_E / \tau_0 = 0.88$$

E に戻してから、続けて加力すると、新しい領域に入り付着応力度は F' まで上昇する。F' 点と 1 サイクル前除荷時 O の関係を図-9、図-10から以下のように決めた。

$$F'(\tau_F, S_F) = (0.93\tau_0, 1.03S_0)$$

複数回の繰返し載荷を経ると、図-11のように G' 点は片振幅繰返し載荷における付着応力が一定になる開始点である。G' 点の付着応力度は図-12から以下のように決めた。

$$G'(\tau_G; S_G) = (0.16\tau_B, 3\text{mm})$$

最終の Q' 点は G' と同じ付着応力度を採用し、座標を以下のように示す。

$$Q'(\tau_Q; S_Q) = (0.16\tau_B, S > 3\text{mm})$$

付着応力は $0.16\tau_B$ より下がることはないと仮定する。

(2) C-D 間で除荷する場合

大変形領域 C-D 間で除荷する場合は図-13 に示すとおりである。O から除荷し H 点に至る。また、更に続けて載荷すると、この応力を維持しつつ、変位のみ増大する。その反転する応力は $\tau_E = \tau_F = 0.16\tau_B$ とする。

3.4 正負繰返し載荷時の履歴特性

3.4.1 正負繰返し載荷包絡線

主筋に丸鋼を使用した大多数の既存建物では 1970 年代に造られたため、それらの建物がこれまでに中小地震を経験し、鉄筋とコンクリートの間の最大付着応力が既に達したと想定し、本論文では付着劣化の τ - S 関係の履歴性状において A-B 間における繰返しのモデル化は行っていない。

試験体の履歴曲線のモデル化を図-14 に示す。本分析に用いたデータは正負漸増繰返し⁷⁾引き抜き試験からの抽出したものであり、試験体数は表-3 に示す $13\phi 4$ 体、 $19\phi 6$ 体である。最大付着応力までの A, B 点の値は前項の示したものである。負側の単調載荷包絡線は正側の包絡線を反転したものである。単調載荷包絡線の O' 点から徐荷し、負方向へ移動後の τ - S 関係における包絡線を O', E, F, G, Q のように決定した。負側は I, J, M, N である。E 点は負側変位から再び戻ってきた時に目指す点である。E 点の変位は O 点と同じであり、付着応力度は O 点の応力に依存し、E 点の座標を以下のように表す。

$$E(\tau_E, S_E) = (\alpha\tau_O, S_O)$$

低減率 α を前節の α と同じ定義とし、図-15 から以下のように決定した。

$$\alpha' = \tau_E / \tau_O = 0.52$$

続けて加力すると、新しい領域に入り付着応力度は F 点まで上昇する。F 点と 1 サイクル前除荷時 O 点の関係を図-16、図-17 から以下のように決めた。

$$F(\tau_F, S_F) = (0.70\tau_O, 1.12S_O)$$

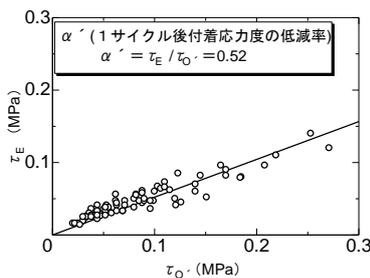


図-15 α' の決定方法

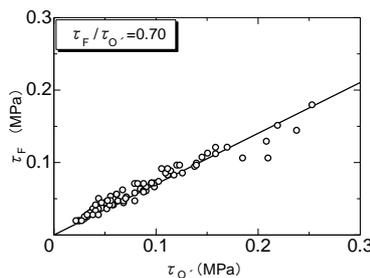


図-16 F 点の付着応力度

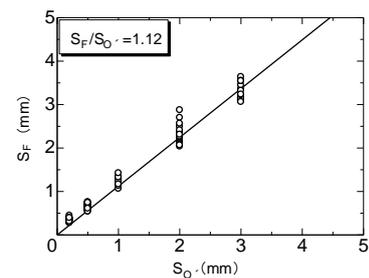


図-17 F 点の抜け出し変位

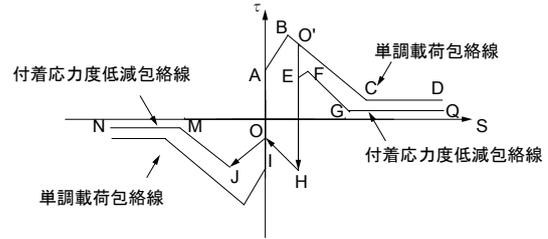


図-14 履歴曲線のモデル化

F 点に達した後、G 点に向かう。G 点は図-18 に示すように繰返し載荷における付着応力がほぼ一定となる開始点である。G 点の付着応力度は図-19 から以下のように決定した。

$$G(\tau_G, S_G) = (0.07\tau_B, 3\text{mm})$$

最終の Q 点は G 点と同じ付着応力度を採用し、座標を以下のように示す。

$$Q(\tau_Q, S_Q) = (0.07\tau_B, S > 3\text{mm})$$

片振幅漸増繰返しの場合と同様に、付着応力は $0.07\tau_B$ より下がることはないと仮定した。

F-G-Q と J-M-N は正負側の付着応力低減包絡線である。繰返し載荷の行いに従って、新しい領域に進入すると、付着応力度の最終上昇点から除荷までのループはこれらの曲線に辿ると考える。

3.4.2 正負繰返し履歴特性

(1) B-C 間で除荷する場合

B-C 間で任意の点 O から除荷した場合について図-20 に示すようにモデル化する。除荷すると応力のみ減少し、荷重が負側に反転しても H 点に至るまで、除荷時と変位は同じである。また、H 点の座標は付着応力度 τ_H と除荷時直前の応力度 τ_O の関係を付けて表わすと以下のようなになる。

$$H(\tau_H, S_H) = (-\beta\tau_O, S_O)$$

β は図-21 から荷重反転時の付着応力度 τ_H と除荷時直前の付着応力度 τ_O の割合から決めた。

$$\beta = |\tau_H / \tau_O| = 0.54$$

H 点に達し、さらに負側に変形を増すと、応力がわずかに減少しつつ変位 0 の I 点に至る。変位が負側に反転

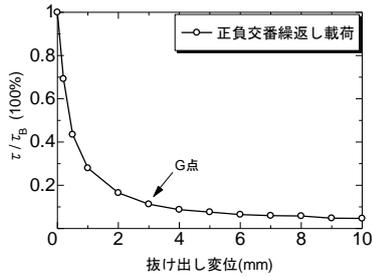


図-18 G点の抜け出し変位

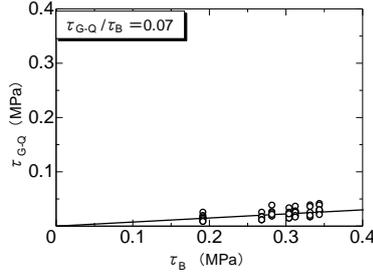


図-19 G~Q点の付着応力度

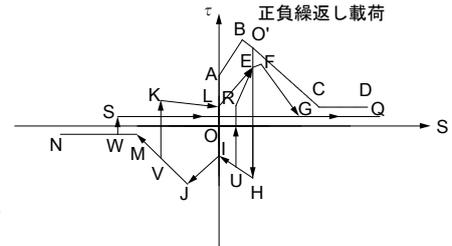


図-20 モデル化履歴曲線
(B-C間で除荷する)

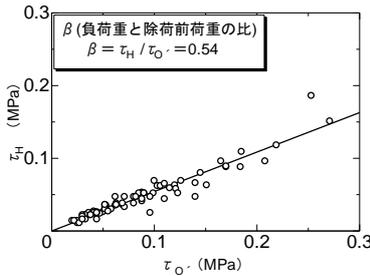


図-21 betaの決定方法

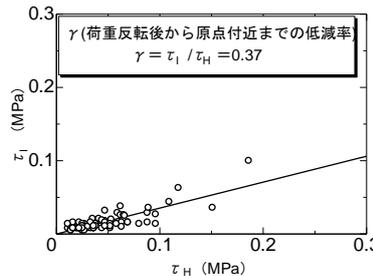


図-22 gammaの決定方法

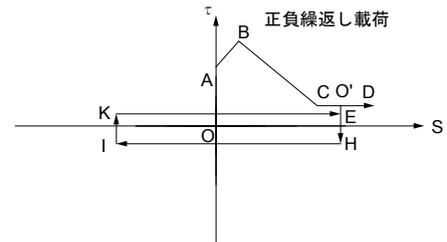


図-23 モデル化履歴曲線
(C-D間で除荷する)

すると荷重は再び増大しはじめる。このように微小変形領域内で荷重が、増減する理由は荷重の反転によって埋め込み長さ区間で付着応力の分布が変化しているためと考えられ、この点については局所付着応力分布等の検討が必要である。I点の座標をH点の付着応力度と関係付けて表すと以下ようになる。

$$I(\tau_I, S_I) = (\gamma\tau_H, 0\text{mm})$$

gammaは図-22に示すように原点に到達した付着応力度 τ_I と荷重反転時の付着応力度 τ_H の割合によって決めた。

$$\gamma = \tau_I / \tau_H = 0.37$$

変位 0 から荷重は再び増加しはじめ、J点に至る。ここでJ点の座標はF点の座標を負側に反転させたものと同じと仮定して、以下のようにした。

$$J(\tau_J, S_J) = (-\tau_F, -S_F)$$

更に変位をそのまま負方向に増加させると、付着応力度低減骨格曲線 J-M-N を辿る。M点、N点はG点、Q点を反転させたものである。B-C間またはF-G間で除荷した場合、次の3ケースについてモデル化した。

① H-I間で荷重が反転する場合 (U点)

経路は U-R-E-F とし R 点の座標は

$$R(\tau_R, S_R) = (-\beta\tau_U, S_U)$$

とする。また、 $\tau_R = -\beta\tau_U \leq 0.07\tau_B$ の場合、 τ_R の値は $0.07\tau_B$ とする。

② I-M間で荷重が反転する場合 (V点)

経路は V-K-L-E-F となる。各点の座標はこれまでのルールと同じとし、以下のようにした。

$$K(\tau_K, S_K) = (-\beta\tau_V, S_V)$$

$$L(\tau_L, S_L) = (\gamma\tau_K, 0)$$

また、 $\tau_K = -\beta\tau_V \leq 0.07\tau_B$ の場合、 τ_K の値は $0.07\tau_B$ とする。その後 V から除荷また再載荷すると、付着応力度は $0.07\tau_B$ を維持したまま、K から L に至る。その後の経路は前述した経路と同じである。

③ M-N間で荷重が反転する場合 (W点)

経路は W-S-G となる。大変形領域で荷重が反転する場合、応力は低減せずそのまま反転するものとする。これは大変位になると付着力は最大付着応力度 τ_B に対し、かなり低下するとともに付着応力度の鉄筋方向の分布はほぼ一樣になるためと考えられる。

$$|\tau_W| = |\tau_S| = 0.07\tau_B$$

(2) C-D間で除荷する場合

大変形領域 C-D間または G-Q間で除荷する場合は図-23に示すとおりである。Oから除荷しH点に至る。また、逆方向に続けて載荷すると、この応力を維持しつつ、変位のみ増大する。負方向に移動中にI点から除荷する場合、反転する応力は $\tau_K = \tau_E = 0.07\tau_B$ とする。

4 モデル曲線妥当性の検討

tau-S 関係の提案したモデル曲線と実験値の整合性を検討するため、片振幅繰返し載荷及び正負繰返し載荷において鉄筋径 13φ の微小変位領域 (0~1mm) と大変形領域 (0~5mm) における実験値との比較を行った。19φ については 13φ と同様の傾向を示すため紙面の都合上割愛した。比較検討例を図-24、図-25に示す。提案した復元力特性モデルは微小変位から大変形領域にわたって、全体的な傾向を追跡できていると考えるが、変形が小さい領域では応力が急変するため十分に追跡で

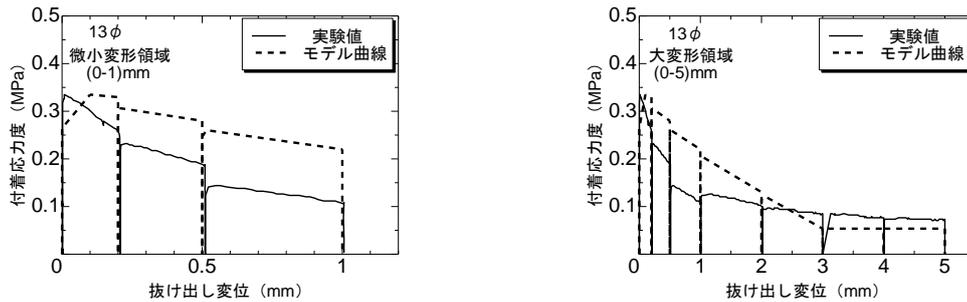


図-24 実験値とモデル曲線の比較（片振幅繰返し）

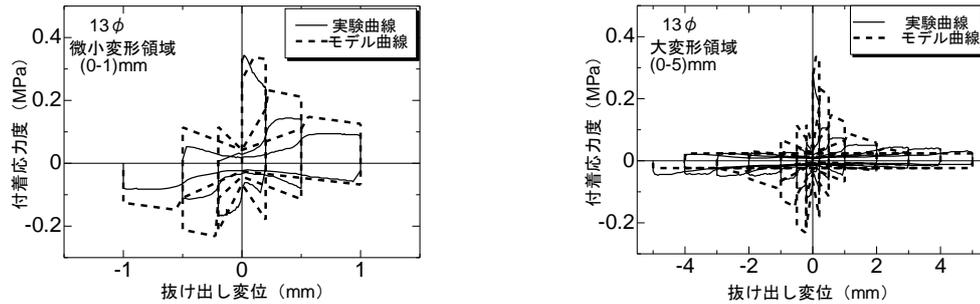


図-25 実験値とモデル曲線の比較（正負繰返し）

きていない部分が見られた。本論文では簡略化のために繰返しによる包絡線の志向点を図-14中のG点の様に1点に仮定したが、微小変位領域で精度を向上させるためには志向点を複数設ける必要があると考えられる。また、今回提案したモデル化曲線では τ_B に実験値を用いていることや付着応力度として試験区間で一様としていることなど、多くの仮定を設けている。実用上の精度を確保するためにはさらに検討する必要があると考えている。

5 結論

- 1) 低強度コンクリートと丸鋼の付着応力度—抜け出し変位関係における包絡線を応力上昇域、最大耐力以降の低下域、大変形時の応力一定域の3領域に分類した。
- 2) 付着応力度—抜け出し変位関係における基準点の応力を最大付着応力度に関係づけてモデル化した。また、その時の変位は実験値に基づき一義的に決定した。
- 3) 繰返し载荷において徐荷時応力および変位に関係づけて除荷後の志向点をモデル化した。
- 4) 実験値と比較した結果、応力が急落する微小変形領域では誤差があるものの、全体的な傾向は推測可能であることを示した。

付着特性はコンクリート強度ばかりでなく施工条件や実験における载荷方法などに大きく依存することは従来から指摘されていることである。提案したモデルは筆者等が行った引き抜き実験に基づくものであり、今後のデータの蓄積が望まれる。

謝辞

本研究の実施にあたっては平成23年度科学研究費補助金（基盤研究(B)課題番号：21360268 代表研究者：広島大学大学院准教授荒木秀夫）の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：2001年改定版既存鉄筋コンクリート建築物の耐震診断基準・同解説，2001.1
- 2) 坂巻健太，広沢雅也，清水泰，周建東：既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート強度に関する研究(その1)設計基準強度の変遷および圧縮強度の分布，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.801-802，2001.9
- 3) 日本コンクリート工学協会中国支部；低強度コンクリートに関する特別研究委員会報告書，2009.2
- 4) 永山正幸，八十島章，加川順一，荒木秀夫：エポキシ樹脂注入による既存RC梁の補修効果：コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.3，pp.1615-1620，2008.7
- 5) 伊木勇人，松井剛ほか：丸鋼を用いた低強度コンクリート柱の耐震性能評価，コンクリート工学年次論文集，pp.889-894，2010
- 6) 荒木秀夫，吉田俊太郎，洪成，加川順一：低強度コンクリートと丸鋼の付着強度とその補強効果；コンクリート工学年次論文報告集，Vol.32，No.2，pp.883-888，2010.7
- 7) 洪成，荒木秀夫：繰返し荷重下の低強度コンクリートと丸鋼の付着性状に関する研究；日本建築学会技術報告集，第38号，pp.171-176，2012.2
- 8) 森田司郎・角徹三：繰返し荷重下における鋼とコンクリート間の付着特性に関する研究，日本建築学会文報告集，第229号，pp.15-24，1975.3
- 9) 谷資信 東浦章：鉄筋とコンクリートの付着に関する研究：線形解析上のモデル化，学術講演梗概集，構造系51(構造系)，1261-1262，1976-08-25
- 10) Duff A. Abrams：Tests of bond between concrete and steel，Published 1913 by University of Illinois in Urbana